

赵婷, 张义, 赵伟, 等. 退耕还林还草工程对土壤微生物和土壤酶影响的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(1): 9-14.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.01.003

退耕还林还草工程对土壤微生物和土壤酶影响的研究进展

赵婷¹, 张义³, 赵伟¹, 程帅¹, 刚成诚^{2,3}, 程积民^{1,2,3}

(1. 西北农林科技大学动物科技学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100;

3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要:退耕还林还草工程是土地利用方式改变的重要形式之一, 它主要是以植被恢复为出发点, 对严重退化的土地进行生态修复, 从而达到改善土壤质量和区域生态环境的目的。在植被恢复过程中, 土壤微生物和土壤酶能快速准确地指示土壤肥力的变化状况, 因此对这两者的研究是目前植被恢复生态学的研究热点。通过实施退耕还林还草工程后, 本文从不同植被恢复模式和时空动态变化层面对土壤微生物量、微生物区系组成与种群数量变化及土壤酶活性变化的影响进行综述, 并提出今后在植被恢复过程中对土壤微生物和土壤酶研究的侧重点, 旨在为研究退耕还林还草后续工程经营管理、巩固现有建设成果及可持续发展提供参考依据。

关键词:退耕还林还草; 植被恢复; 土壤微生物; 生物量; 区系组成; 土壤酶

中图分类号: S181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)01-0009-06

长期以来, 由于自然灾害和人类对生物资源的不合理开发利用, 我国大部分地区呈现自然植被破坏严重、水土流失严重、土地荒漠化加剧、水涝灾害问题突出及生物多样性下降等现象^[1-4]。这些生态环境问题, 不仅导致土地退化严重、土壤质量下降且难以被利用, 而且严重制约着我国生态环境安全和国民经济的可持续发展, 因此植被恢复和生态建设迫在眉睫, 实施退耕还林还草政策势在必行。退耕还林还草工程以保护和改善生态环境为出发点, 在对土地资源适宜性评估的基础上, 本着因地制宜, 适地适树的宗旨, 把对生态环境造成不利影响的耕地转变为林地或草地, 进而实施改善区域生态环境的林草植被恢复措施^[5]。退耕还林还草工程极大地提高了生态系统的服务功能, 其生态效应已引起了广泛关注^[6]。如黄土高原地区长期的水土流失等现象倍受关注, 自1999年该地区大规模开展退耕还林还草项目以来, 大部分区域的生态环境问题已取得了显著成效^[7-9]。研究显示, 实施退耕还林还草工程后, 土壤理化性质明显改善, 土壤碳汇能力提高, 风沙危害减轻, 有效遏制了草地退化、水土流失等系列问题^[8,10]。植被生态恢复是实施退耕还林还草政策的最终落脚点, 通过增加植被盖度、降低土壤侵蚀及养分流失, 经微生物降解作用使土壤酶活性和有机质含量增加, 提高土壤肥力,

进而达到改善区域生态环境的目的。

土壤是植被生长发育的载体, 为植物提供生长所需的水分及矿质营养, 同时植被在生长过程中通过产生凋落物和根系分泌物来调节土壤理化性质, 改善土壤肥力, 两者形成了相互调节的土壤-植被复合系统^[11-12]。实施退耕还林还草工程后, 土壤各矿质养分及有机质含量均有不同程度的增加, 这与不同的植被恢复模式改变原有的土壤酶活性、土壤微生物区系结构组成以及调节土壤质量有密切关系。土壤微生物是土壤中有生命活动的部分, 直接参与土壤养分循环和有机质分解等生理生化过程, 是生态系统中物质循环和能量流动的驱动力^[13-15]。土壤酶主要来源于土壤微生物和动植物及其残体的分泌, 是土壤中一切生物化学过程的参与者, 酶活性大小也表征了土壤中物质代谢的旺盛程度^[16]。土壤微生物和土壤酶共同推动着土壤中的各种生化过程, 对环境的变化极为敏感, 能够较早地指示生态系统功能的细微变化, 可作为评价土壤肥力和健康状况的生物学指标。退耕还林还草政策的根本措施是通过植被生态修复来改善退化土地的质量状况, 调节区域气候环境。因此, 研究退耕还林还草后植被生态恢复对土壤微生物和土壤酶活性的影响很有必要。

针对实施退耕还林还草工程后的植被恢复效应研究主要集中在区域生态恢复最佳植被优化模式的选择、不同植被恢复类型和恢复时间对土壤理化性状及土壤微生物的影响等方面, 对退耕还林还草后不同植被恢复模式下土壤微生物量、微生物区系组成及数量变化、土壤酶活性的研究结果差异很大, 虽然已经取得了部分有意义的成果^[4,17-19], 但还须长期关注研究。本文总结开展退耕还林还草工程后, 不同植被恢复模式对土壤微生物和土壤酶活性的影响, 并提出今后在土壤微生物和土壤酶方面研究的侧重点, 旨在科学地评价退耕还林还草工程的生态及经济效益。

收稿日期: 2017-05-07

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2016YFC050700); 国家自然科学基金(编号: 31602004、41601586)。

作者简介: 赵婷(1993—), 女, 陕西咸阳人, 硕士研究生, 从事旱区草地生态研究。E-mail: zt465801995@163.com。

通信作者: 程积民, 研究员, 从事旱区草地生态研究, Tel: (029) 87012272, E-mail: gyzcjm@ms.iswc.ac.cn; 刚成诚, 博士, 副研究员, 从事草地生态学研究, Tel: (029) 87012272, E-mail: gangcheng024@gmail.com。

1 不同植被恢复模式对土壤微生物的影响

1.1 不同植被恢复模式对土壤微生物量的影响

土壤微生物量是指土壤中除去活的植物根系和大型动物外体积小于 5 mm^3 的具有生命活性特性的有机质总量,包括细菌、真菌、藻类和原生动物等^[17]。土壤微生物量含量虽然仅占土壤有机质的 3%~5%,却是调控生态系统中碳、氮等养分循环的关键,被称为土壤活性养分储存库^[20-21]。土壤中微生物量越多,微生物群落活跃程度就越高,在一定程度上表征该生态系统具有较强的物质循环和促进植被生长发育的能力,且土壤微生物量中 C、N、P 等元素周转快、灵敏度高,对环境的变化极为敏感,能较早期指示生态系统功能的变化,对土壤质量的监测具有指示作用,是评价土壤质量和肥力状况的重要生物学指标^[22-24]。退耕还林还草措施增加了地被覆盖度,使侵蚀土壤的营养物质流失减少,有机质含量增加,土壤进行物质循环与能量转化所需的碳源、氮源增加,为微生物的快速繁殖提供了充足的营养来源,从而有效提高了土壤微生物活性和土壤微生物量^[25]。

植被恢复后退耕地土壤微生物量中 C、N 含量较农耕地显著提高^[15,21,25-26]。薛蕙等对侵蚀黄土丘陵区 6 种不同植被恢复 30 年后的土壤微生物研究表明,退耕地土壤微生物量中 C、N 含量均显著高于坡耕地,且土壤微生物量中 C、N 含量增幅明显^[17]。赵彤等对黄土沟壑区植被恢复后土壤微生物性状的研究结果^[21,26-27]与其结论相似,只是土壤微生物量 C、N 含量在不同植被类型下的增幅略有差异,但增加幅度基本相当。但有学者对喀斯特地区的研究结果与前人的试验结论不一致,他们认为不同退耕还林还草模式下土壤微生物量 C 含量较坡耕地显著增加,但土壤微生物量 N 含量略有下降趋势^[24,28]。可能由于退耕前的农地残留了施入的大量有机肥及无机氮肥,供土壤微生物快速繁殖的养料充足,无机氮肥为土壤微生物补给了大量氮源,因而出现了土壤微生物量 N 含量略高于不同类型恢复地的异常变化^[29]。土壤微生物量 P 由于受土地地形、pH 值及施肥情况等多种因素的影响,其作用机制比较复杂,因而对其在植被恢复下的研究结果存在差异。张笑培等研究发现,黄土丘陵区不同植被恢复模式下土壤微生物量 P 含量较农耕地均有明显的增加趋势^[18,27,30]。崔晓晓等对喀斯特地区植被恢复的不同阶段土壤性质的研究却发现,土壤微生物量 P 含量在退耕地—草本—灌木—乔木的不断成熟演变过程中呈现先降低后升高再降低的趋势^[31]。凡是能引起土壤理化性质变化的因素均能引起土壤微生物量 P 的变化,对植被恢复过程中土壤微生物量 P 的动态变化研究仍然存在很大争议,后续研究亟待从土壤微生物量 P 的作用机制出发,深入探讨土壤微生物量 P 在不同恢复模式间的变化特性。

在实施退耕还林还草的过程中,选择植被类型也很重要。不同植被类型所决定的根系分泌物和凋落物种类不同,导致向土壤生态系统中输入的有机质含量和微生物生存环境不同,因而会影响土壤微生物活性及土壤微生物量^[32]。很多学者以典型黄土高原侵蚀丘陵区为例,研究了不同类型植被恢复下土壤微生物量的变化特性,结果表明不同植被恢复模式间土壤微生物量差异显著^[33]。张燕燕等采用通径分析法对

甘肃省定西市 4 种典型人工乔灌木、柠条灌木林、天然草地、撂荒地以及农田表层土壤微生物的研究发现,柠条灌木林通过 20 年的恢复,其地下微生物数量与恢复 50 年的油松林接近,认为豆科柠条灌木林是该区植被恢复的最佳选择,对土壤养分的利用率较其他恢复类型高^[34]。董莉丽等对 8 种不同植被恢复模式下土壤微生物量进行的研究表明,同期退耕及仅 1 年之差的退耕条件下,刺槐林较柠条刺槐混交林及其他模式更有利于土壤微生物量的积累^[35]。丛怀军等也得出了相似的研究结果^[15,29,36]。以刺槐和柠条等豆科为主的植物,其根部共生的根瘤菌可以将大气中的氮素固定于土壤中,进而改变林地根区土壤系统的物质组成和肥力水平^[9]。此外,豆科植被庞大的根系及表层凋落物可通过调节土壤有机碳和土壤氮素循环来影响土壤微生物量及微生物群落结构。混交林在一定程度上可避免纯林凋落物和根系对土壤作用的单一性,对土壤的恢复效果更好,Hu 等对黄土丘陵侵蚀地不同坡位采用森林(forest,简称 F)、草地(grass,简称 G)、G-F-G、F-G-F 等 4 种植被恢复类型对土壤微生物影响的研究表明,G-F-G 和 F-G-F 林草混合模式对土壤微生物量 C、N 含量的提高较单一植被 F 和 G 效果更好,能有效促进土壤修复^[37]。姚小萌等研究也表明,乔木混交林比乔灌木纯林对土壤微生物量 C 含量的增加效果更明显^[32]。混合植被种类丰富且根系多,竞争区土壤微生物种类明显增加,同时也增加了凋落物资源的异质性,可以满足不同种类土壤微生物的营养需求,因而土壤微生物活性及微生物量增加。

土壤微生物易受温度、湿度和气候环境等多因子的综合影响,不同季节所形成的区域环境差异会在一定程度上影响土壤微生物量的分布。研究发现,不同植被恢复模式下土壤微生物量的变化呈明显的季节规律分布^[38]。王风芹等对华北刺槐林、自然恢复地和农田土壤微生物量 C、N 季节动态变化的研究表明,土壤微生物量 C 在刺槐林地春、夏季较高,在自然恢复地和农田秋季最高;土壤微生物量 N 在刺槐林和农田夏季最高,在自然恢复地春季最高^[39]。胡婵娟等研究^[40]得出了与之类似的结论。从退耕后土壤微生物量的季节变化分析来看,春、夏季较秋、冬季能更好地促进土壤微生物的繁殖。土壤微生物量对引起环境变化的各因子极为敏感,不同季节对土壤微生物量的影响在很大程度上是通过改变水、热条件等调节土壤微生物的生存环境来实现的。一般而言,在春季随着温度的升高土壤逐渐解冻,地表大量枯落物的覆盖提升了地温,土壤微生物活性及分解能力增强,微生物含量随之增加;夏季温度虽然很高,但降水相对充沛,植被生长旺盛、根系发达,土壤微生物生存所需的养分充足,土壤微生物量可持续保持在较高的水平。秋季以草本植物为主的自然恢复地和农田土壤微生物含量相对较高,可能与以下原因相关。(1)秋季雨热同步明显,温度也相对较高,温暖湿润的气候环境有利于土壤微生物的繁殖。(2)农田多以一年生的草本植物为主,根系相对树木寿命短且主要分布在浅土层,虽然地上有机物质的输入少,但秋季大量根系死亡及地表凋落物的积累,为微生物提供了更多的可利用资源^[39]。冬季温度下降,营养物质匮乏,土壤微生物能源供应量少,微生物含量为全年最低。

在植被恢复过程中,剖面土壤微生物量的分布呈明显的

垂直分布规律,即随着土层深度的增加,土壤微生物含量呈下降趋势。马俊梅等对甘肃省武威市民勤县退耕地植被恢复过程中土壤微生物量 C、N、P 动态研究表明,各土层土壤微生物量差异显著,且随着土壤深度的增加,土壤微生物量逐渐减少^[41]。郭曼等研究也发现,土壤微生物量 C 在植被恢复过程中具有明显的表聚性,由高到低依次为表层土壤(0~5 cm)、中层土壤(5~10 cm)、下层土壤(10~20 cm)^[42]。翟辉等研究也证明了土壤微生物量的层次分布规律^[9,43~44]。土壤中的大多数微生物属于有机营养型,随着土壤深度的增加,根系分泌物和脱落物不断减少且土层温度下降,土壤中有机物质和无机物质逐渐减少,为土壤微生物提供的营养物质减少,减慢了微生物的自身合成代谢,因而土壤微生物量减少^[45]。另外,表层土壤具有的较好通透性和水热条件也促使了土壤微生物量在表层大量积聚,但这种垂直变化规律并不是完全固定的,由于不同退耕还林还草模式的物种选择及其配置不同,导致凋落物的凋落规律、凋落物数量和组成以及形成的微环境不同,微生物代谢底物的差异导致各土层微生物数量的分布受影响,所以土壤微生物量的垂直分布存在差异^[46]。从怀军等发现,土壤微生物量 C 在土壤表层(0~5 cm)及中下层(5~20 cm)均有增加,但中下层较表层土壤增速缓慢,土壤微生物量 N 在各土层间没有显著差异,土壤微生物量 P 在各土地利用方式下土壤表层及深层无显著差异^[15]。

1.2 不同植被恢复模式对土壤微生物区系组成及数量分布特征的影响

土壤微生物种群数量的分布不仅是土壤中有机与无机养分的组成与转化、土壤通气性能及土壤微生物活性的具体体现^[47],而且能敏感地反映土壤生态系统受外界环境影响的细微变化,也是衡量土壤系统健康程度的重要指示物^[23]。土壤微生物群落结构主要由细菌、真菌及放线菌 3 大类微生物区系组成。真菌具有分解有机质、为植物提供养分的功能,构成了土壤的大部分微生物生物量^[48]。放线菌具有喜热耐旱的特性,只有当各类微生物的竞争压力减小时才出现,主要参与枯落物及残体等难分解物质的分解活动,并将其转化为土壤有机组分,与土壤肥力有密切关系^[49]。研究表明,退耕还林还草后,土壤微生物种群数量在植被恢复过程中显著增加^[50]。龙健等对喀斯特严重侵蚀区采取 4 种不同植被恢复措施^[47]。刘飞渡等对亚热带红壤区 4 种不同人工恢复林下 3 大类土壤微生物类群数量进行的研究发现,植被恢复措施显著增加了土壤微生物种群数量^[51]。这与植被恢复过程中不同植被凋落物、根系分布及分泌物对土壤的扰动作用密切相关,土壤微生物活性的增强促进了微生物各类群数量的增加。

在植被生态恢复过程中,不同植被类型对 3 大类土壤微生物数量的分布和区系组成有较大影响。魏媛等研究发现,在退化喀斯特地区从裸地—草本—灌木—乔木的恢复过程中,微生物种群数量显著增加,细菌类群分布较真菌和放线菌占绝对优势,乔木阶段为恢复的顶级群落,各微生物数量最高^[52]。邵玉琴等对内蒙古黄甫川人工油松林、天然恢复草地和耕地的研究发现,不同恢复模式下土壤微生物各类群数量由高到低依次为细菌、放线菌、霉菌,且细菌、放线菌和霉菌数量分别在人工油松林、耕地和天然恢复草地最多^[49]。于扬等研究发现,在 3 种森林生态系统中细菌数量较多,以禾本科植

物较多的坡耕地、草丛和灌丛放线菌比例最大,真菌类群分布不足 1%^[23]。从微生物类群组成来看,许多研究认为细菌是土壤微生物总量的主要组成者,占微生物总量的 95%~99%,因而土壤微生物总数的变化是由细菌类群决定的^[11,53]。但鹿士杨等发现,土壤微生物种群数量在 7 种不同退耕还林还草模式下的分布不同,放线菌是坡耕地、任豆 11 桂牧 1 号(间作)、桂牧 1 号和撂荒模式土壤微生物的主要类群,占微生物总量的 71.3%~96.4%,细菌是任豆、香椿、板栗和柑橘模式土壤微生物的主要类群,占总量的 55.2%~71.8%,真菌在各模式中所占比例较低^[24]。一般认为禾本科植物成分越多,放线菌数量就越多,促进物质循环与能量流动的效率就越高^[45],因此在禾本科植物多的耕地及撂荒地放线菌数量较多。不同退耕还林还草模式植被组成和发育阶段不同,植被产生的凋落物种类及根系分泌物在数量及质量上存在差异,而这两者又是微生物的食物,因而会影响微生物种群数量和群落组成^[54]。

3 大类土壤微生物种群数量也具有一定的季节变化规律。张健等对 2 种退耕还桦木和苦竹林的研究发现,细菌的种群数量季节动态呈倒“V”形变化,即从春季持续增加,秋季达全年最大值,冬季降为最低值;放线菌的种群数量季节变化呈“V”形趋势,春季到秋季逐渐减少,而后持续增加,冬季达全年最大值;真菌的种群数量在冬季最大,其他各季节增减幅度不大^[55]。刘子雄等研究也得出了相似的结论^[4,53]。土壤微生物各类群季节动态与其自身生物学特性和小气候内热状况随季节的变化密切相关^[56]。对细菌类群而言,夏、秋两季雨热同步明显,根系活动处于生长旺盛期,分泌的物质增多,温暖湿润的条件更适宜细菌的繁殖,而在寒冷的冬季,降水减少且气温较低,细菌的生长受到抑制,且林地中难分解物质增多,所以细菌数量急剧降至全年最低值,春季气温回升且降水增加,细菌数量逐渐增加。对放线菌来说,细菌在夏、秋两季的快速繁殖增加了自身生存压力,不利于其生存繁殖。各土壤微生物类群随季节变化的分布差异很大,并不完全同上述研究结果一致。Wu 等用磷脂脂肪酸(phospholipid fatty acids, 简称 PLFA)分析方法对 2 种典型植被的土壤微生物种群季节动态研究发现,细菌、放线菌和真菌类群季节变化呈夏季>秋季>春季>冬季的分布特征^[57]。魏媛等研究发现,在喀斯特地区植被恢复阶段细菌和放线菌类群的季节变化为夏、秋季>春、冬季,而真菌类群的季节变化呈夏季>春季>秋季>冬季的分布特点^[52]。一般夏、秋两季高温多雨的环境使土壤过干或过湿,真菌的生长繁殖受到抑制,而冬季林木枯落物及动植物残体归还土壤,为参与难分解物质转化的真菌类群提供了有利条件,真菌数量理论上在冬季达到最大值。但目前的研究对真菌数量的季节动态变化存在异议,这可能是因为真菌类群除了受不同季节的降水、气温、有机质分解及腐殖质积累的影响,还与林木吸收利用养分等因素有关,具体原因有待深入研究。

3 大类群土壤微生物数量在土壤剖面也具有明显的层次分布规律,随着土壤深度的增加,各类群数量逐渐减少。张宏霞等对黄土丘陵区^[19],王理德等对石羊河下游^[44]退耕还林地土壤微生物类群数量研究发现,3 大类土壤微生物类群数量均表现为表层高于深层,且随着土壤深度的增加而逐渐减

少。土壤微生物各类群数量分布的表聚效应与多种环境因子密切相关,可能由于枯枝落叶较多的表层土壤结构疏松,通气状况较深层土壤好,营养物质丰富,微生物分解的枯落物受降水下渗的影响,使土壤肥力自上而下降低。但刘子雄等发现,在退耕还桦木和苦竹林地真菌和放线菌数量的层次变化很明显,而细菌在两林地间各土层数量差异不大,农耕地却有明显的垂直分布规律^[53]。这说明各土壤微生物类群数量的垂直分布不但与环境变化有关,而且与土壤微生物各类群在特定林型下的生长特性有联系,具体原因应根据研究区特定的气候环境和建植的植被类型来解释。

2 不同植被恢复模式对土壤酶活性的影响

土壤酶主要来源于土壤中的动植物和微生物,是土壤生态系统的生物催化剂,参与许多重要的生物化学过程,酶活性在一定程度上可反映土壤所处的状况,在土壤中的数量虽少,却能敏感地揭示土壤肥力的变化,成为土壤生态系统的预警和敏感指标^[44,58]。土壤蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶能很好地表征土壤碳、氮、磷的供应程度与土壤腐殖化程度及有机质的积累程度^[9]。已有很多学者对这 4 种土壤酶在植被恢复过程中的变化进行了研究,基本都认为植被恢复措施可大幅度提高土壤酶活性,促进土壤理化性状和肥力的改善,进而达到土壤生态修复的目的^[24,51,59]。

土壤酶活性的变化与土壤地被覆盖物的数量和质量有关,而地被覆盖物的种类和数量受不同植被类型及恢复年限等因素的影响,因而对土壤酶活性也有影响^[60]。张笑培等对黄土高原不同植被类型和不同恢复年限下的土壤酶活性研究发现,随着退耕年限的延长,土壤脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性逐渐增加,且这 3 种土壤酶活性在荆条林、3 种刺槐林和苜蓿地之间的增长幅度差异明显^[18]。张勇等研究发现,土壤碱性磷酸酶、脲酶和蔗糖酶活性在裸地—草本—灌木—乔木的自然演替过程中呈逐渐增加趋势,各演替阶段增幅差异很大,这说明在不同植被恢复下,退耕年限的延长增加了地被枯落物的厚度,土壤有机质含量增加、营养物质丰富、微生物代谢活跃、土壤酶活性增强,同时也说明土壤碳、氮、磷在生态系统中的有效周转^[61]。过氧化氢酶为氧化还原酶,它在植被恢复过程中的活性变化不同于其他 3 种水解酶。杨宁等研究认为,除 3 种水解酶之外,过氧化氢酶活性随裸荒地—草本—灌木—乔木植被恢复阶段的推进而逐渐减小^[62]。黄懿梅等研究^[63]也得出了类似的结论。随着植被恢复年限的延长,促使土壤有机碳(soil organic carbon,简称 SOC)积累增加,高的 SOC 易形成还原条件的土壤环境,不利于过氧化氢酶活性的增强^[62]。蔡立佳等研究发现,下辽河平原不同退耕年限杨树林地过氧化氢酶活性显著高于农地,且随着林地年限的延长其活性逐渐增强,认为退耕还林可能会导致土壤中过氧化氢类毒害物质的增加^[64]。这与上述研究结论相驳,说明在植被生态恢复过程中,植被类型选择及退耕年限的确定对土壤酶活性的影响很大,而对于过氧化氢酶活性的异常变化须要进行深入研究。

土壤酶活性与土壤微生物同样具有明显的表聚效应。刘飞渡等发现,红壤丘陵区 0~40 cm 土层的 3 种水解酶(土壤脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶)活性随土层深度的增加而逐渐

下降^[51]。王理德等对石羊河流域^[44],文都日乐等对呼伦贝尔^[65]不同类型植被恢复下的土壤酶活性研究也发现,3 种水解酶和过氧化氢酶活性随土层的加深而逐渐减小。随着植被恢复过程的不断推进,土壤表层枯落物厚度的增加使地表升温,空气热交换高于深层土壤,因而表层土壤酶活性很高。但剖面土壤酶活性除了受植被类型、气候条件及外界环境等因素影响外,酶本身的性质也很重要^[9]。李林海等对黄土丘陵区^[66]、杨宁等对衡阳紫色土丘陵坡地^[62]不同植被恢复下剖面土壤酶活性的研究发现,3 种水解酶活性的层次分布规律明显,但过氧化氢酶活性随土层的加深逐渐增加。过氧化氢酶是一种氧化还原酶,可将土壤生化反应过程中产生的过氧化氢分解为水和氧气,降低过氧化氢类物质对土壤的毒害作用,其活性在土壤剖面的异常表现可能是因为表层过多土壤根系和凋落物的积累,增加了表层土壤的 SOC 含量,所形成的还原性土壤环境不利于其在表层的生存,而随着土层的加深,根系分泌的毒害物质减少, SOC 含量的积累减少,不利的土壤环境被打破,因而其活性逐渐增加。

3 小结与展望

土壤微生物量、微生物区系结构和土壤酶活性能很好地表征土壤肥力状况^[67-68],对指示严重退化土地的植被修复过程具有很重要的作用。目前,已有许多学者围绕退耕还林还草后植被恢复对土壤微生物量、土壤微生物数量及土壤酶活性的影响进行深入探讨,并且对指导生态环境严重恶化区域的植被恢复和生态重建起到了指导性作用。但由于植被恢复需要在很长的时间尺度才能达到改善土壤质量的目的,且植被生态重建过程受植被类型、气候条件和外界环境等多种因素的影响,因此相关研究工作还存在一些不足之处。今后应从以下几个方面来深入探讨退耕还林还草工程对土壤微生物和土壤酶活性的影响:

(1)着重加强退耕还林还草工程实施后,土壤微生物量、微生物区系组成及数量分布和土壤酶活性对植被生态恢复过程的响应机制研究。关于在植被恢复过程中土壤微生物和土壤酶活性的变化虽然已进行了大量研究,但主要集中于不同植被恢复模式对土壤微生物量和土壤酶活性的影响程度及理化性质动态变化的研究层面上,对植被生态重建下土壤微生物量(C、N、P 等元素)、土壤微生物数量(真菌、细菌和放线菌)和土壤酶活性在不同植被恢复模式和时空动态变化层面的内在响应调节机制研究还不是很透彻,因此今后可考虑从调节机制入手,加强对植被恢复过程中土壤微生物和土壤酶活性的动态影响变化研究,旨在为以后退耕还林还草过程的实施提供科学的理论依据。

(2)力争建立一套完整有效的评价模型,将土壤微生物量、微生物数量区系结构和土壤酶活性三者有效结合起来评价植被的生态恢复效应也是今后须要考虑的研究方向之一。土壤微生物是土壤酶的重要来源之一,在植被恢复过程中两者之间有很密切的联系。在植被生态重建过程中,大多数研究均选取土壤微生物或者土壤酶活性单个指标来说明植被恢复对土壤质量的改善效应,虽然有研究将两者结合起来考虑,但仅仅是通过相关性分析来说明土壤微生物和土壤酶活性之间的关系密切与否,而这种相关关系因研究区地理环境、植被

类型和人为因素的影响,研究结果差异性很大。因此,亟须构建一套指示性较强的指标评价模型,将土壤微生物量、微生物区系数量和土壤酶有效结合起来,来弥补单指标对植被恢复效果评价的不足,可以更好地为退耕还林还草生态重建过程提供系统完整的评价指标。

扩大退耕还林还草工程实施的空间尺度对全方位监测退化土地的生态修复有重要的指示意义。综合许多研究结果来看,退耕还林还草工程的实施主要集中在土壤侵蚀及土地退化较为严重的地区,以黄土高原最为典型,因此黄土丘陵区是退耕还林还草工程开展的重点区域之一。然而这在某种程度上忽略了对退化和侵蚀程度较轻地区的植被生态修复,从而使其在多种影响因素的作用下恶化程度加深,不利于当地健康生态环境的形成。因此,在今后的退耕还林还草工程开展过程中,应大尺度全方位监测土壤质量的变化状况,及时并有效根据因地制宜、适地适树的原则选择需要建植的恢复植被,尽量使退耕还林还草工程实施的效果最优化。

参考文献:

- [1] Parr T W, Sier A R, Battarbee R W, et al. Detecting environmental change: science and society – perspectives on long – term research and monitoring in the 21st century[J]. Science of the Total Environment, 2003, 310(1/2/3): 1 – 8.
- [2] 苏成西, 尚宇南. 不同退耕还林模式的土壤抗冲性研究[J]. 河南农业科学, 2014, 43(8): 57 – 63.
- [3] 李姝江, 朱天辉, 刘子雄. 不同退耕还林模式对土壤生物学性质的影响效果评价[J]. 水土保持通报, 2013, 33(6): 129 – 135.
- [4] 刘子雄, 朱天辉, 张健. 不同退耕还林模式下土壤微生物区系分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2005, 29(4): 45 – 48.
- [5] Zhang B Q, He C S, Burnham M, et al. Evaluating the coupling effects of climate aridity and vegetation restoration on soil erosion over the loess plateau in China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 539: 436 – 449.
- [6] Wang J T, Peng J, Zhao M Y, et al. Significant trade – off for the impact of grain – for – green programme on ecosystem services in North – Western Yunnan, China [J]. Science of the Total Environment, 2017, 574: 57 – 64.
- [7] Chen L D, Gong J, Fu B J, et al. Effect of land use conversion on soil organic carbon sequestration in the loess hilly area, loess plateau of China[J]. Ecological Research, 2007, 22(4): 641 – 648.
- [8] Deng L, Shanguan Z P, Li R. Effects of the grain – for – green program on soil erosion in China [J]. International Journal of Sediment Research, 2012, 27(1): 120 – 127.
- [9] 翟辉, 张海, 邱梅, 等. 黄土高原退耕坡地不同类型林分土壤生物学活性的研究[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(4): 33 – 38, 72.
- [10] Liu D, Chen Y, Cai W W, et al. The contribution of China's grain to green program to carbon sequestration [J]. Landscape Ecology, 2014, 29(10): 1675 – 1688.
- [11] 董旭. 青海省湟水河流域不同退耕还林模式土壤效应[J]. 水土保持通报, 2011, 31(5): 45 – 48.
- [12] 郭永红, 张义华, 张宏霞, 等. 天水市退耕还林(草)不同造林模式对土壤养分的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(30): 16980 – 16983.
- [13] Harris – Hellal J, Vallaey T, Garnier – Zarli E, et al. Effects of mercury on soil microbial communities in tropical soils of French Guyana[J]. Applied Soil Ecology, 2009, 41(1): 59 – 68.
- [14] Green J, Bohannan B J. Spatial scaling of microbial biodiversity[J]. Trends in Ecology and Evolution, 2006, 21(9): 501 – 507.
- [15] 从怀军, 成毅, 安韶山, 等. 黄土丘陵区不同植被恢复措施对土壤养分和微生物量 C、N、P 的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 217 – 221.
- [16] 万忠梅, 吴景贵. 土壤酶活性影响因子研究进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(6): 87 – 92.
- [17] 薛蕙, 刘国彬, 戴全厚, 等. 不同植被恢复模式对黄土丘陵区侵蚀土壤微生物量的影响[J]. 自然资源学报, 2007, 22(1): 20 – 27.
- [18] 张笑培, 杨改河, 任广鑫, 等. 黄土高原南部植被恢复对土壤理化性状与土壤酶活性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(6): 64 – 68.
- [19] 张宏霞, 沈育伊, 郭永红. 黄土高原丘陵沟壑区不同退耕还林模式对土壤微生物的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(32): 15782 – 15783, 15786.
- [20] Arunachalam A, Pandey H N. Ecosystem restoration of jhum fallows in Northeast India: microbial C and N along altitudinal and successional gradients [J]. Restoration Ecology, 2003, 11(2): 168 – 173.
- [21] 赵彤, 闫浩, 蒋跃利, 等. 黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5615 – 5622.
- [22] Kennedy A C, Smith K L. Soil microbial diversity and the sustainability of agricultural soils [J]. Plant and Soil, 1995, 170(1): 75 – 86.
- [23] 于扬, 杜虎, 宋同清, 等. 喀斯特峰丛洼地不同生态系统的土壤肥力变化特征[J]. 生态学报, 2013, 33(23): 7455 – 7466.
- [24] 鹿士杨, 彭晚霞, 宋同清, 等. 喀斯特峰丛洼地不同退耕还林还草模式的土壤微生物特性[J]. 生态学报, 2012, 32(8): 2390 – 2399.
- [25] Hu Y F, Peng J J, Yuan S, et al. Influence of ecological restoration on vegetation and soil microbiological properties in alpine – cold semi – humid desertified land [J]. Ecological Engineering, 2016, 94: 88 – 94.
- [26] 张笑培, 杨改河, 王得祥, 等. 黄土高原沟壑区不同植被恢复模式对土壤生物学特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(5): 149 – 154, 159.
- [27] 吴建平, 韩新辉, 许亚东, 等. 黄土丘陵区不同植被类型下土壤与微生物 C、N、P 化学计量特征研究[J]. 草地学报, 2016, 24(4): 783 – 792.
- [28] 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 等. 喀斯特峰丛洼地退耕还林还草的土壤生态效应[J]. 土壤学报, 2011, 48(6): 1219 – 1226.
- [29] 成毅, 安韶山, 李国辉, 等. 宁夏黄土丘陵区植被恢复对土壤养分和微生物生物量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 261 – 266.
- [30] 莫小香, 叶功富, 游水生, 等. 海岸退化沙地不同植被恢复模式的土壤微生物量及其与土壤养分的关系[J]. 福建林学院学报, 2013, 33(2): 146 – 150.
- [31] 崔晓晓, 王圳, 王纪杰, 等. 喀斯特峡谷区植被恢复过程中土壤性质变化[J]. 福建林学院学报, 2011, 31(2): 165 – 170.
- [32] 姚小萌, 周正朝, 王凯博, 等. 黄土丘陵沟壑区天然植被恢复类

- 型对土壤微生物碳的影响[J]. 干旱区研究, 2016, 33(6): 1287–1293.
- [33] Sinha S, Masto R E, Ram L C, et al. Rhizosphere soil microbial index of tree species in a coal mining ecosystem[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(9): 1824–1832.
- [34] 张燕燕, 曲来叶, 陈利顶, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤微生物特性[J]. 应用生态学报, 2010, 21(1): 165–173.
- [35] 董莉丽, 郑粉莉, 安娟. 黄土丘陵区不同土地利用类型下土壤微生物生物量特征[J]. 土壤通报, 2010, 41(6): 1370–1375.
- [36] 胡婊娟, 傅伯杰, 靳甜甜, 等. 黄土丘陵沟壑区植被恢复对土壤微生物生物量碳和氮的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(1): 45–50.
- [37] Hu C J, Fu B J, Liu G H, et al. Vegetation patterns influence on soil microbial biomass and functional diversity in a hilly area of the loess plateau, China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2010, 10(6): 1082–1091.
- [38] 吴小玲. 喀斯特地区土壤微生物量效应研究[J]. 湖南农业科学, 2011(15): 79–82.
- [39] 王风芹, 田丽青, 宋安东, 等. 华北刺槐林与自然恢复植被土壤微生物量碳、氮含量四季动态[J]. 林业科学, 2015, 51(3): 16–24.
- [40] 胡婊娟, 刘国华, 陈利顶, 等. 黄土丘陵沟壑区坡面上土壤微生物生物量碳、氮的季节变化[J]. 生态学杂志, 2011, 30(10): 2227–2232.
- [41] 马俊梅, 王理德, 郭春秀. 民勤绿洲退耕地自然恢复过程中土壤微生物量碳、氮、磷动态变化[J]. 中国农学通报, 2015, 31(32): 132–136.
- [42] 郭曼, 郑粉莉, 安韶山, 等. 植被自然恢复过程中土壤有机碳密度与微生物量碳动态变化[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 229–232, 238.
- [43] 刘苑秋, 王芳, 柯国庆. 江西瑞昌石灰岩山区退耕还林对土壤有机碳的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(4): 885–890.
- [44] 王理德, 姚拓, 王方琳, 等. 石羊河下游退耕地土壤微生物变化及土壤酶活性[J]. 生态学报, 2016, 36(15): 4769–4779.
- [45] 漆良华, 张旭东, 彭镇华, 等. 湘西北退化侵蚀地植被恢复区土壤养分、微生物与酶活性的典范相关分析[J]. 林业科学, 2008, 44(9): 1–6.
- [46] Bending G D, Turner M K, Rayns F, et al. Microbial and biochemical soil quality indicators and their potential for differentiating areas under contrasting agricultural management regimes[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(11): 1785–1792.
- [47] 龙健, 李娟, 滕应, 等. 贵州高原喀斯特环境退化过程土壤质量的生物学特性研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 47–50.
- [48] 张晶, 张惠文, 李新宇, 等. 土壤真菌多样性及分子生态学研究进展[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1958–1962.
- [49] 邵玉琴, 刘钟龄, 贾志斌, 等. 不同治理措施对退化草原土壤可培养微生物区系的影响[J]. 中国草地学报, 2011, 33(5): 77–81.
- [50] Li J J, Zheng Y M, Yan J X, et al. Succession of plant and soil microbial communities with restoration of abandoned land in the loess plateau, China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13(4): 760–769.
- [51] 刘飞渡, 韩蕾. 亚热带红壤丘陵区不同人工林型对土壤理化性质、微生物类群和酶活性的影响[J]. 生态环境学报, 2015, 24(9): 1441–1446.
- [52] 魏媛, 张金池, 俞元春, 等. 贵州高原退化喀斯特植被恢复过程中土壤微生物数量的变化特征[J]. 浙江林学院学报, 2009, 26(6): 842–848.
- [53] 刘子雄, 朱天辉, 张健. 两种不同退耕还林模式下的土壤微生物特性研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 132–135, 149.
- [54] Wang G B, Zhou Y, Xu X, et al. Temperature sensitivity of soil organic carbon mineralization along an elevation gradient in the Wu-yi Mountains, China[J]. PLoS One, 2013, 8(1): e53914.
- [55] 张健, 朱天辉, 刘子雄. 土壤微生物对不同退耕还林模式的响应[J]. 林业科学, 2007, 43(增刊1): 110–113.
- [56] Chen S, Zhang C Z, Liu D B, et al. Seasonal variation in the biomass of soil decomposer microbes and its relationship to the soil habitat in the leymus chinensis grasslands in Northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica, 1995, 15(1): 91–94.
- [57] Wu Z Y, Lin W X, Li J J, et al. Effects of seasonal variations on soil microbial community composition of two typical zonal vegetation types in the Wuyi Mountains[J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(6): 1056–1065.
- [58] 邱莉萍, 张兴昌, 程积民. 坡向坡位和撂荒地对云雾山草地土壤酶活性的影响[J]. 草业学报, 2007, 16(1): 87–93.
- [59] 郭彦军, 韩建国. 农牧交错带退耕还草对土壤酶活性的影响[J]. 草业学报, 2008, 17(5): 23–29.
- [60] Bell T H, Klironomos J N, Henry H A. Seasonal responses of extracellular enzyme activity and microbial biomass to warming and nitrogen addition[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(3): 820–828.
- [61] 张勇, 杜华栋, 张振国, 等. 黄土丘陵区自然植被恢复下土壤微生物学质量演变特征[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1): 6–11, 17.
- [62] 杨宁, 杨满元, 雷玉兰, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地土壤酶活性对植被恢复的响应[J]. 生态环境学报, 2014, 23(4): 575–580.
- [63] 黄懿梅, 安韶山, 曲东, 等. 黄土丘陵区植被恢复过程中土壤酶活性的响应与演变[J]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 152–155.
- [64] 蔡立佳, 徐永刚, 宇万太, 等. 下辽河平原杨树连栽对土壤养分、微生物生物量和酶活性的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(2): 337–343.
- [65] 文都日乐, 李刚, 张静妮, 等. 呼伦贝尔不同草地类型土壤微生物量及土壤酶活性研究[J]. 草业学报, 2010, 19(5): 94–102.
- [66] 李林海, 邱莉萍, 梦梦. 黄土高原沟壑区土壤酶活性对植被恢复的响应[J]. 应用生态学报, 2012, 23(12): 3355–3360.
- [67] 方凯凯, 贾曼莉, 杜毅飞, 等. 生草栽培下果园土壤酶活性与肥力因子的关系[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(8): 461–466.
- [68] 乔继杰, 马振朝, 王玮, 等. 河北低平原夏玉米高产田土壤酶与肥力特征[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(12): 484–487.